

小惑星の可視・近赤外反射スペクトル解析法とその応用

二村徳宏

小惑星の大部分は、進化過程で破壊されて小さくなる。そのため、地球、火星、月ほど強い浸食、熱変成、再溶融をほとんど経験していないと考えられている。よって、それを構成する鉱物組み合わせ、鉱物の化学組成、水質変成・熱変成・宇宙風化などの二次的過程の程度を調べることにより、太陽系内での初期物質分布とそれらが経験した温度・圧力などの環境を理解し、太陽系生成論モデル計算における制約条件を与えることができる。

この固体惑星表面の鉱物学的特長を遠隔探査によって解明するために有用な方法の 1 つが可視・近赤外反射分光である。しかしながら、その解析には以下の 2 つの問題が存在する。

(1) 小惑星のように大気のない天体表面上では、宇宙風化という現象が存在する。これは太陽風や微小隕石衝突を含む宇宙空間の厳しい環境による変化である(図 1.)。宇宙風化によって、反射スペクトルは赤化、暗化、吸収帯弱化が生じる [Pieters *et al.*, 1993] (図 2.)ため、固体惑星表面の反射分光解析が困難である。

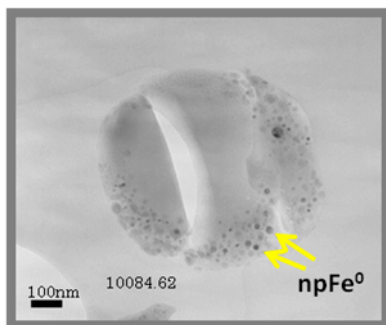


図 1. 月のレゴリスの TEM 画像。ナノ鉄微粒子 (npFe⁰) を見ることができる。

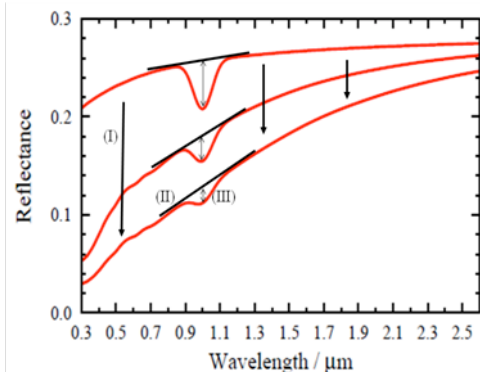


図 2. 宇宙風化作用の可視・近赤外反射スペクトルへの影響。宇宙風化により、可視・近赤外反射スペクトルは、吸収帯の暗化 (I), 赤化 (II), 吸収帯の弱化 (III) が生じる [Pieters *et al.*, 1993]. それによって、鉱物の特徴ある吸収を分離・同定することを困難にしている。

(2) 可視・近赤外反射分光データは多種の鉱物に起因する複数の幅広い吸収帯が接近して複合吸収帯を形成しているため、反射分光データ解析において各鉱物の吸収帯分離抽出が困難である(図 3)。

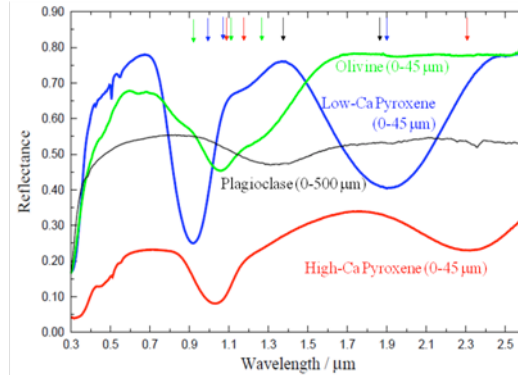


図 3. Visible and near-infrared spectra of カンラン石 (Fa#=11, Fo#=89) [Sunshine and Pieters, 1998](緑色), 低 Ca 輝石 (Fs#=30, En#=70) [Kilma *et al.*, 2007](青色), 高 Ca 輝石 (Wo#=40, Fs#=30, En#=30)(赤色), および斜長石 [Pieters, 1996](黒色)の可視・近赤外反射スペクトル。個々の吸収帯をそれぞれの色の矢印でしめす。

本研究では、上記 2 点の問題解決を行った。

はじめに、宇宙風化作用により生成されるナノ還元鉄(npFe^0)粒子を含んだ蒸着層を持つレゴリス粒子の光散乱特性を、Hapke [2001]に倣いモデル化した。具体的には、吸収係数への効果以外に境界反射率変化も考慮しモデル化することで、問題(1)を解決した。本モデルを用いることで、従来から難題とされてきた、月のレゴリスのような宇宙風化度が大きい反射スペクトルにおいても、宇宙風化層の厚さと宇宙風化層中の npFe^0 の体積濃度を見積もることを可能にした (図 4.)。

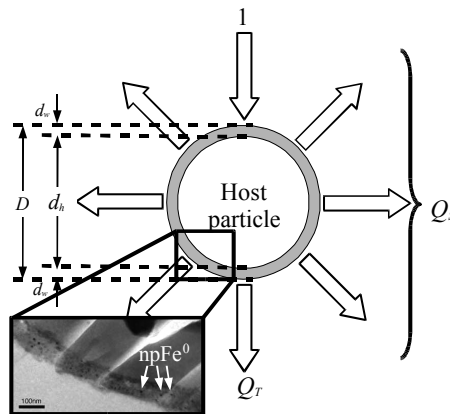


図 4. 宇宙風化作用を受けたレゴリスのモデル粒子。D, d_h , および d_w はそれぞれレゴリスの直径、host particleの直径、宇宙風化層の厚さを示す。Inset: 宇宙風化層のTEM画像[Noble, 2002]。 Q_s および Q_r はそれぞれ散乱係数および消散係数を示す。

次に、珪酸塩の吸収係数について考察した。珪酸塩鉱物の複雑な吸収スペクトルを個別の吸収帯に分離する 1 つの方法として、修正ガウス関数モデル(MGM)[Sunshine *et al.*, 1990]が一般的に使用されている(例、図 5.)。本研究では、主要造岩鉱物であるカンラン石、低 Ca 輝石、および高 Ca 輝石の化学組成(Fe、Mg、Ca 量)と吸収帯パラメータ(吸収帯の中心波長、幅、強度比)の関係を求めた(例、図 6.)。また、同じく主要造岩鉱物である斜長石の吸収帯の中心波長、幅、強度比も求めた。そして、この関係を MGM 計算に組み込むことにより、問題(2)を解決した。

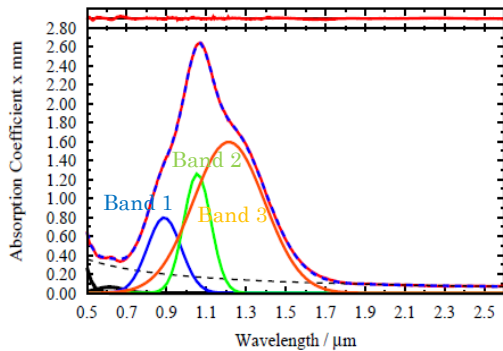


図 5.カンラン石の吸収係数の MGM 解析。測定された実際のスペクトルは赤色、フィッティング結果を青色の破線。コンティニウムを黒色の破線。ガウス関数は青色とオレンジ色が M1 サイト、緑色が M2 サイトの吸収を示す。一番上の赤色の線は実際のスペクトルとフィッティング結果の残差を示している。

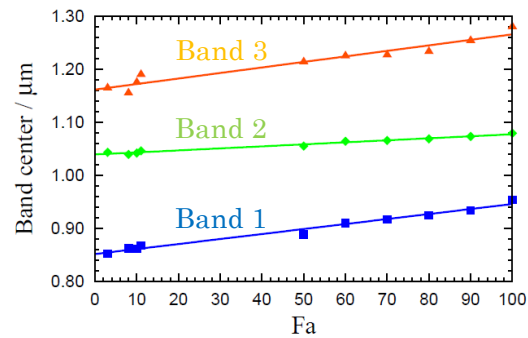


図 6. カンラン石の 3 つの吸収帯中心波長 Bands 1 と 3 は M1 site, そして band 2 は M2 site である。

以上 2 つのモデルおよび鉱物混合モデルを用いて、大気のない固体天体の可視・近赤外反射スペクトルから、天体表面物質の鉱物組み合わせ、構成鉱物の化学組成、鉱物の粒子サイズ、宇宙風化度を推定できる統一モデルを構築した。

そして、本研究で構築した統一モデルを 3 つの小惑星(6 Hebe、433 Eros および 25143 Itokawa)の可視・近赤外反射分光データに応用し(例、図 7.)、解析で推定されたそれらの表面組成が隕石中に豊富な H コンドライト(6 Hebe)および LL コンドライト(433 Eros、25143 Itokawa)に対応することを示した。その事実は、他の既存の手法によっても明らかにされていたが、本研究では、それら小惑星の表面物質の Mg 値、カンラン石・低 Ca 輝石・高 Ca 輝石・斜長石という 4 つの鉱物混合比、粒子サイズ、宇宙風化度について、可視・近赤外反射スペクトルを解析することのみで決定した(例、表 1.)。さらに各小惑星のレゴリスについて、宇宙風化作用によってできた蒸着層の厚さおよびその層内の npFe⁰ の体積濃度を個別に決定した。その結果、3 つの小惑星の間で蒸着層の厚さと npFe⁰ の体積濃度に違いがあるということ新たに発見した。前者は、重力が小さく細粒のレゴリスを長く保持できず、表面が岩石や粗粒のレゴリスからなる天体において、その表面が細粒なレゴリスを保持している天体より長く宇宙風化にさらされていると考えることで説明できる。これは重力の大きな天体において、内部の新鮮な物質が掘り返され表面が刷新されていることを示

唆している。後者は天体表面での金属鉄の存在度の違いによって説明できる。この発見は、H コンドライトが LL コンドライトよりも金属鉄に富んでいるという事実と整合的である。また同じ LL コンドライト的組成を持つにもかかわらず、433 Eros は 25143 Itokawa よりも高い $npFe^0$ の体積濃度を示しており、25143 Itokawa よりもサイズが大きな 433 Eros 上では LL コンドライト鉱物組み合わせ中の金属鉄を珪酸塩から分離する何らかのメカニズムがある可能性を示唆している。例えば、433 Eros に十分な細かさのレゴリスがあって、振動により金属鉄がレゴリス表面に濃集することが考えられる。NEAR 探査機が発見した Pond はそのようなメカニズムによって形成されたかもしれない。

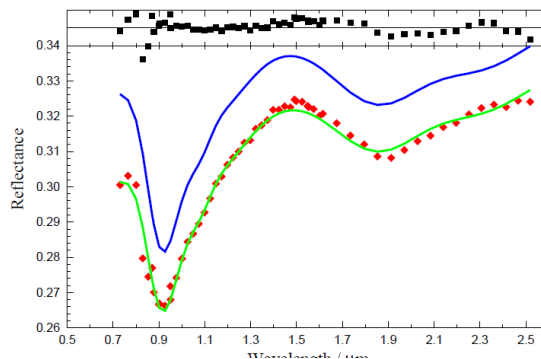


図 7. 小惑星6 Hebeの可視・近赤外反射スペクトル[Chapman and Gaffey, 1979; McFadden 1984]の解析結果。観測結果およびモデルスペクトルをそれぞれ赤色および緑色で示す。青色の線は宇宙風化作用の効果をモデルから取り除いたときのスペクトル。黒色は観測結果およびモデルスペクトルの残差を示す。

表 1. 小惑星の可視・近赤外反射スペクトルの解析結果。 d_h 、 d_w 、 ϕ_w 、および Φ_w は、それぞれ、host particle の直径、宇宙風化層の厚さ、ナノ鉄微粒子の体積濃度を示す。Mg# は $Mg \times 100 / (Mg + Fe)$ である。OL : LCP : HCP : PL は、カンラン石、低 Ca 輝石、高 Ca 輝石、および斜長石の体積比を示す。

| | 6 Hebe (Telescopic) | 433 Eros (Telescopic) | 25143 Itokawa (Telescopic) | 25143 Itokawa (Hayabusa NIRS) |
|-------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| d_h (μm) | 40 | 40 | 50 | 60 |
| d_w (nm) | 6 | 7 | 9 | 8 |
| Mg# | 83 | 75 | 75 | 75 |
| OL : LCP : HCP : PL | 43:39:6:12 | 58:19:5:18 | 62:21:5:11 | 58:21:6:15 |
| Meteorite type | H | LL | LL | LL |

本研究は、端成分鉱物の可視・近赤外吸収係数スペクトルを鉱物の吸収帯の特徴を組み込んだガウス関数によって規定することにより、未知変数の数を大幅に減らし、それと混合モデルおよび宇宙風化モデルを統一的に同時適用することによって、未知の鉱物混合物の反射スペクトルから、物質同定を行う意欲的で斬新な試みである。これは、世界初の試みであり、将来も引き続き発展する可能性のある手法である。